

fMRI Study of Japanese Sentence Comprehension: Neuropsychological Approach to Phrasal Segmentation (fMRIによる日本語の文理解 の研究-神経心理学的視点から見た文理解における 句分節処理-)

著者	大嶋 秀樹
号	7
学位授与番号	101
URL	http://hdl.handle.net/10097/44029

おおしま ひで き 大 嶋 秀 樹

学位の種類 博士（国際文化）

学位記番号 国博 第 101 号

学位授与年月日 平成21年 3 月25日

学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当

研究科・専攻 東北大学大学院国際文化研究科（博士課程後期 3 年の課程）
国際文化交流論専攻

学位論文題目 fMRI Study of Japanese Sentence Comprehension:
Neuropsychological Approach to Phrasal Segmentation
(fMRI による日本語の文理解の研究
－神経心理学的視点から見た文理解における句分節処理－)

論文審査委員 (主査)

教授 宮 本 正 夫

教授 小 野 尚 之

准教授 中 本 武 志

准教授 ナロック・ハイコ

准教授 ワーナー・ピーター・ジョン

准教授 杉 浦 元 亮（加齢医学研究所）

論文内容の要旨

1 はじめに

本研究は、日本語の文理解における、句の分節処理をテーマに、その脳機能を、日本語の視覚刺激と聴覚刺激の使い、明らかにしようとした研究である。

2 研究の背景

文を処理し理解するためには、文がどのような要素によって構成されているかを知り、文を語や句や節などの言語的単位として認識して分解し、さらに、個々の言語的単位にまとめて文に統合するという、分解と統合の操作が必要であるといわれている（坂本，1998）。分解と統合の操作は、母語の文法に関する知識にもとづいて行われるといわれるが、我々が母語の文法に関する知識を所

有しているという事実は、我々は、まったく同じ構成要素でありながら、(1a) は正しい文だか、(1b) はおかしい文だということが直観的に区別できることからもうかがい知ることができる。

(1 a) 太郎が次郎に本をあげた。

(1 b) * を次郎あげた本が太郎に。(坂本, 1998)

また、我々は、

(2 a) たろうがじろうにほんをあげた

という文を、自然な語のまとまりに区切るように言われると

(2 b) たろうが じろうに ほんを あげた

という、語のまとまりに区切ることができる直観も持っている。

したがって、(2 a) のような文を

(2 c) た ろうがじ ろう にほんを あ げた

というような、語のまとまりに区切ることはないし、また、(2 c) のような区切りの文を目にしたり聞いたりすると、とたんにおかしいと感じる。こうした直観は、われわれ人間が、文に構造があることを示す証拠として、人間の文法能力を表す直感に例えられることもある。

こうした、人間が句のまとまりを作る処理を取り上げ、そうした処理には、文法的処理だけでなく、意味的処理も関わっているという説が出されるようになった (Culicover & Jackendoff, 2005)。そこで、本研究は、人間の文を句に分節したり、語を句にまとめたりする能力を、fMRI を使った脳科学的手法を使った研究により、句への分節処理に、どのような脳活動に関わり、また、そうした脳活動は、言語的にどのような情報資源 (文法的、音韻・韻律的、意味的情報) の関与があるか、明らかにしようとしたものである。

3 実験1 (視覚刺激による文分節処理の実験)

実験課題名：

日本語仮名文字文の意味的分節処理－書字言語の分節処理に特異な領域は存在するか

実験日： 平成17年2月 ～ 平成17年3月

目的

言語の意味処理においては、分節処理を経た語句の意味認知処理が介在することが指摘されている。英語をはじめとする欧米の書字言語では、単語間にスペースを入れて分かち書きをし、分節処理はスペースを手がかりに視覚的に行われると言われる。日本語の書字言語でも、書字体系（文字の種類）の混在が、分節処理を視覚的に助けるという指摘があるが、分節処理が視覚的に行われているのか、意味的に行われているかは明らかではない。特に、日本語の仮名文字文の分節処理では、スペースや漢字、片仮名のような視覚の手がかりが存在しないため、語句の意味認知処理を行ううえで、単語や語句の意味を基にした分節処理が顕著であることが予想される。実験では、仮名文字文の視覚処理における、言語の分節処理の脳内メカニズム及び分節処理と意味処理の関連について明らかにする。

方法

被験者は、右利きの日本語を母国語とする20～25歳の大学生、大学院生16名（男性11名、女性5名）である。

視覚刺激は、課題刺激として、15モーラの仮名文字文刺激を4カテゴリー（意味が正しい仮名文字文（Non-segmented semantically correct sentence, NC）、誤った意味の仮名文字文（Non-segmented semantically incorrect sentence, NI）、意味が正しい分節した仮名文字文（Segmented semantically correct sentence, SC）、誤った意味の分節した仮名文字文（Segmented semantically incorrect sentence, SI））をそれぞれ30文、計120文用意した。被験者は、刺激が意味的に正しいか、誤っているかボタン押しをして判断した。コントロール刺激として、仮名の母音文字「い」の文字を数え、その数の偶数・奇数を判断する仮名文字文刺激（仮名文字文（Controlled, non-segmented sentence, CN）、分節した仮名文字文（Controlled, segmented sentence, CS））を60文用意した。被験者は、「い」の文字の偶数・奇数を、ボタン押しで判断した。奇数刺激文、偶数刺激文は、それぞれ30文で、1対1の割合とした。視覚刺激は、課題刺激120文、コントロール刺激60文のそれぞれを乱数により無作為に並べ、各4ブロック（課題刺激各ブロック30文、コントロール刺激各ブロック15文）に分けて、課題刺激ブロックとコントロール刺激ブロックを交互に並べて、提示刺激とする event related design とした。提示刺激は、課題刺激を先行して提示する条件とコントロール刺激を先行して提示する条件の2条件で提示し、提示順による効果の相殺（カウンターバランス）を図った。提示刺激は、刺激提示用ソフトウェア Presentation を使用し、fMRI 装置のスキャンと同期して提示した。

撮像パラメータは、スライス数：33、スライス厚：3 mm、ギャップ：0.99mm、TR：3000 ms、TE：50、フリップ角：90、FOV：192mm、ボクセルサイズ：3 × 3 × 3.99mm、マトリック

ス：64×64、スキャン数：375+ダミー、撮像部位：全脳 とした。

撮像した画像は、SPM2 により、被験者内解析、被験者間解析を実施した。

結果

(NC+SC) - (CN+CS) の差分により、意味的に正しい文の文処理に関わる大脳皮質領域を特定し、特定した activation peak について、非分節処理 (NC: Figure 1.) と分節処理 (SC: Figure 2) とを比較し、分節処理の効果を調べた (Table 1.) ($p < 0.001$, クラスターサイズを用いた多重比較により、閾値を $p < 0.05$ に補正)。

Figure 1. NC

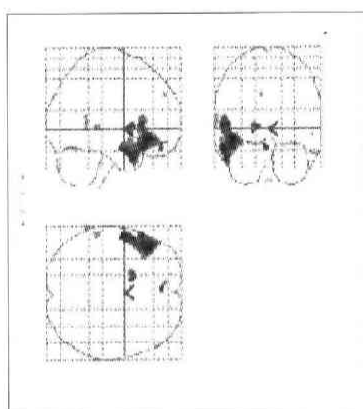


Figure 2. SC

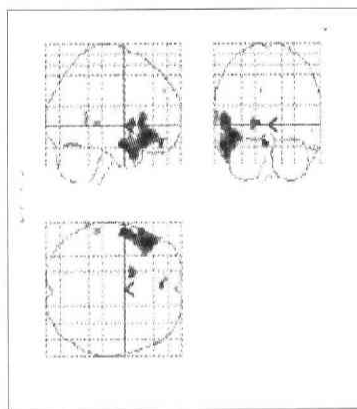


Table 1. Activated brain areas in the comparison between NC and SC

Anatomical region	t	x	y	z
Left inferior frontal gyrus	**	-48,	24,	-18
Left inferior frontal gyrus	ns	-52,	22,	26
Left inferior frontal gyrus	**	-46,	28,	-10
Left middle temporal gyrus	ns	-56,	-4,	-18
Left middle temporal gyrus	ns	-54,	12,	-30
Left basal nucleus	ns	-16,	12,	0
Left superior temporal gyrus	ns	-64,	-46,	10

** : $p < .005$

その結果、left inferior frontal gyrus (LIFG) の二箇所について、分節処理に比べ、非分節処理に有意な活性化 ($p < .005$) が見られた (Figure 3 及び Figure 4)。

Figure 3. Significantly Activated Area in NC: $-48, 24, -18$

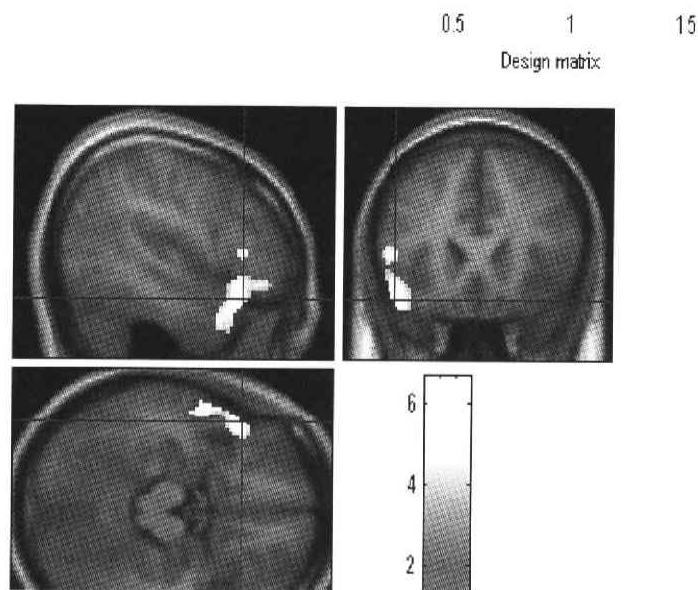
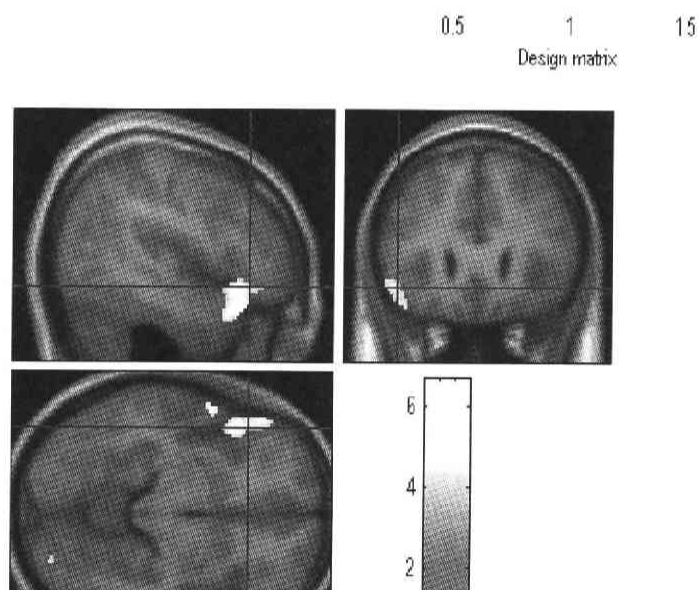


Figure 4. Significantly Activated Area in NC: $-46, 28, -10$



考察

音声言語では、連続した音声の流れから語を分節し意味を切り出す処理は、どの言語にも普遍的に見られる現象である。しかし、語の分節処理を伴う意味処理は、文字言語では、分かち書きを常としない日本語の文に特有に現れる現象である。とりわけ、日本語の仮名文字文は、日本語の音声（モーラ）を直接反映した仮名から構成され、文字言語でありながら、音声言語の分節処理、意味処理の特徴をもよく反映している。実験では、分節の視覚的手がかり（語間のスペースの有無）の条件を変えることにより、分節処理に関わる特異な脳領域を特定することができた。

特定された意味的に正しい文の分節処理に関わる脳領域は、意味処理に関わる領域といわれている部位である。Friederici は、ERP を用いた文理解の研究から、言語の意味処理には、語句レベルの意味処理と、語句の意味を文の意味へと統合する統合的な意味処理があると述べており、LIFG が語句から文への意味統合の役割を果たす部位である指摘している。また、Dronkers et al. は、脳卒中による脳障害を持つ被験者と健常高齢者の被験者から得られた言語理解テストの結果と脳画像から、LIFG が文レベルの言語理解、とりわけ文の意味理解に重要な役割を果たすことを指摘している。今回の実験で特定された部位は、まさに、Dronkers et al. が指摘する部位であり、fMRI を用いた文理解の研究で、意味処理、とりわけ語彙から文の意味への統合処理に関わる部位と指摘される先行研究の結果ともよく一致している。実験で得られた結果は、日本語の仮名文字文の分節処理が、意味的処理であり、語句から文の意味への統合に関わる意味的処理であるということを示唆するものといえる。

実験からは、日本語の仮名文字文の視覚的分節処理が、意味的処理であるということが明らかになった。今後は、日本語を含むすべての言語に普遍的な、音声言語の分節処理についても、研究を進めたい。

4 実験2（聴覚刺激による文分節処理の実験）

実験課題名： 日本語の文分節処理

－文理解における文分節処理に普遍的な領域は存在するか

実験日： 平成17年8月 ～ 平成17年9月

目的

本実験に先行して実施した、日本語仮名文字文の文分節処理の実験では、日本語の単文（仮名文字文）の視覚的文理解において、文の分節処理に特定の脳領域（the left inferior frontal gyrus, LIFG (pars orbitalis)）が関与し、その結果から、視覚的文理解における文分節処理には、意味処理に関わる脳領域が関与することが明らかになった。本実験では、さらに、日本語の聴覚的文理解処理における、文の分節処理に関わる脳領域を調べ、(1) 聴覚的文理解処理においても、文の分節処理に特異な脳領域の関与が認められるか、また、(2) 視覚、聴覚のそれぞれの文理解処理（単文の文理解）において、共通した脳領域が文の分節処理に関与しているかを明らかにし、視覚、聴覚を通じた文理解処理における、文の分節処理の普遍的特性の有無について理解を深めることを目的とする。

方法

被験者は、右利きの日本語を母国語とする20～27歳の大学生、大学院生14名（男性10名、女性4名）である。

聴覚刺激 (Figure1.) は、課題刺激 (文の意味判断課題) として、15モーラの日本語の文刺激 (単文) を 4 カテゴリー ((1)「意味が正しい、非分節の日本語の文」(Non-segmented semantically correct sentence, **Non-seg Correct**)、(2)「誤った意味の、非分節の日本語の文」(Non-segmented semantically incorrect sentence, **Non-seg Incorrect**)、(3)「意味が正しい、分節した日本語の文」(Segmented semantically correct sentence, **Seg Correct**)、(4)「誤った意味の、分節した日本語の文」(Segmented semantically incorrect sentence, **Seg Incorrect**)) に分けて、カテゴリーごとに、各30文、計120文用意した。被験者は、刺激文を聞いて、刺激が意味的に正しいか、誤っているかボタンを押して判断した。

また、ワーキング・メモリの効果を相殺するコントロール刺激として、日本語の文の文末から数えて、最後から2つ目のモーラ音と同じ音の有無を判断する日本語の文刺激 (15モーラの単文) を 2 カテゴリー ((5)「分節していない日本語の文」(Non-segmented control sentence, **Non-seg Cont**)、(6)「分節した日本語の文」(Segmented control sentence, **Seg Cont**) を、各30文、計60文用意した。被験者は、刺激分を聞いて、文末から数えて2つ目のモーラ音の、刺激文中での有無を、ボタンを押して判断した。

Figure 1. 課題刺激 (意味判断課題) : 非分節文と分節文の例

Non-seg: O-to-ko-no-ko-ga-wa-ta-shi-ni-a-ya-ma-tsu-ta

Seg: Chi-chi-wa a-wa-te-te ka-i-sya-ni mo-do-tsu-ta

課題刺激 (120文)、コントロール刺激 (60文) は、それぞれで、乱数により無作為に並べ、各4ブロック (課題刺激各ブロック30文、コントロール刺激各ブロック15文) に分けた。刺激の提示は、課題刺激 (各4ブロック) とコントロール刺激 (各4ブロック) のブロックを交互に並べて、提示刺激とする event related design とした。提示刺激は、「課題刺激を先行して提示する条件」と「コントロール刺激を先行して提示する条件」の2条件で提示し、提示順による順序の学習効果の相殺 (カウンターバランス) を図った。また、刺激提示の音声は、男性の声による音声と女性の声による音声により、ブロックごとに交互に提示し、男女の声の聴覚上の違いによる聞きやすさ、聞きにくさの効果の相殺を図った。提示刺激の音声は、音声の特性を一定に保つため、音声作成ソフトウェアにより作成した男女の音声を使用した。提示刺激は、刺激提示用ソフトウェア Presentation を使用し、fMRI 装置のスキャンと同期して提示した。

撮像パラメータは、スライス数 : 33、スライス厚 : 3 mm、ギャップ : 0.99mm、TR : 3000 ms、TE : 50、フリップ角 : 90、FOV : 192mm、ボクセルサイズ : 3 × 3 × 3.99mm、マトリックス : 64 × 64、スキャン数 : 375 + ダミー、撮像部位 : 全脳 とした。

撮像した画像は、SPM2 により、Preprocessing、統計解析を実施した。

結果

聴覚的文理解処理における、文の分節処理に関わる脳領域を特定するために、まず、**Non-seg Correct** – **Seg Correct** の差分による直接比較 (direct comparison) を実施したが、統計的に有意な脳領域の特定はできなかった。次に、(**Non-seg Correct** + **Seg Correct**) – (**Non-seg Cont** + **Seg Cont**) の差分により、意味的に正しい文の文処理に関わる脳領域を特定し (Figure 2.)、特定した activation peak について、**Non-seg Correct** と **Seg Correct** とを比較し、文分節処理の効果を調べた ($p < 0.001$, クラスターサイズを用いた多重比較により、閾値を $p < 0.05$ に補正)。

Figure 2. (**Non-seg Correct** + **Seg Correct**) – (**Non-seg Cont** + **Seg Cont**)

R

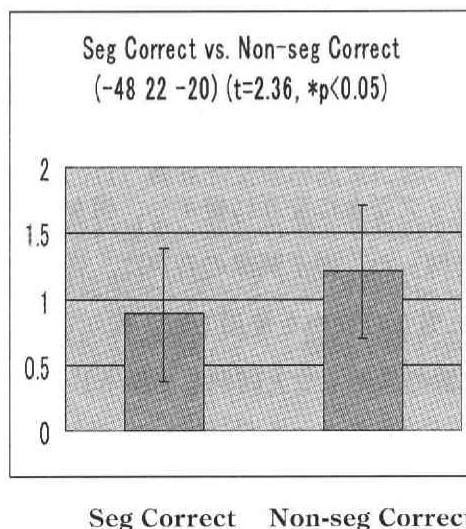
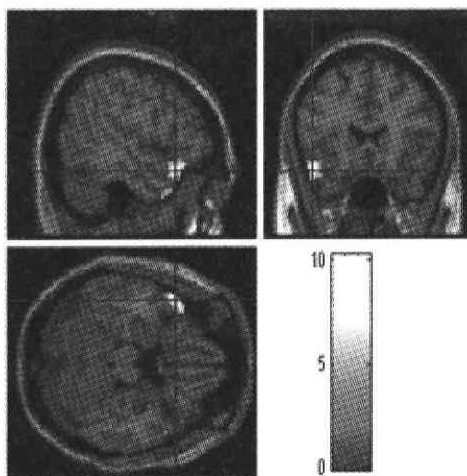


L



その結果、LIFG (pars orbitalis) ($-48, 22, -20$) において、分節処理に比べ、非分節処理に有意な活性 (**Seg Correct** < **Non-seg Correct** ($p < .005$)) が見られた (Figure 3.)。

Figure 3. **Seg Correct** < **Non-seg Correct**



考察

視覚的文理解処理における実験では、分節の視覚的手がかり（語間の分節スペースの有無）の条件の違いから、文の分節処理に関わる大脳皮質領域（LIFG(pars orbitalis)（-48, 24, -18）&（-46, 28, -10））を特定した。本実験では、聴覚的文理解処理において、分節の聴覚の手がかり（語間の分節ポーズの有無）の条件の違いから、文の分節処理に関わる大脳皮質領域（LIFG(pars orbitalis)（-48, 22, -10））を特定した。両実験の結果からは、視覚においても聴覚においても、文理解処理においては、文の分節処理に関わる特定の脳領域が存在することが明らかになった。さらに、視覚と聴覚の異なる条件の実験から、同様の大脳皮質領域（LIFG(pars orbitalis)）で、分節の効果による有意な活性が見られた。この結果は、LIFG(pars orbitalis)が、文理解における文の分節処理に関与することを示唆するものといえる。両実験で特定された大脳皮質領域は、意味処理に関わる領域であることが指摘され、なかでも、文理解における意味的情報の選択や統合に関わる部位であるという指摘をする実験結果とよく一致している。文理解における文の分節処理と文理解における意味的情報の選択や統合との関係については、さらに実験や考察が必要であるが、視覚による実験と聴覚による実験（本実験）の結果は、文の分節処理が、意味処理に関わる大脳皮質領域（LIFG(pars orbitalis)）で行われていることを示しており、分節処理が音声の韻律的要素（prosodies）の処理や音声単位（音節やモーラ）の規則性（statistical regularities）の学習効果と関わるという従来の指摘とは異なる結果を示している。

5 おわりに

論文では、実験の事実や背景だけでなく、心理学的な言語処理への考察や脳の電氣的、磁氣的反応に基づいた、言語処理のモデルについても言及し、文分節処理と文理解、文処理との関わりについても論考しようと努めた。論文では、文分節処理と文理解、文処理との関わりやメカニズムまでは明らかにできなかったが、文分節処理の先行研究は、韻律的效果による文の区切り（prosodic phrasing や intonational phrase）についての研究例はあるが、そもそも韻律的效果による文の区切り自体言語的には根拠がなく恣意的なものだとする指摘（Selkirk, 1984; Jackendoff, 1987）の指摘もあり、韻律的分節と文から句への分節とは、異なる神経基盤に基づいた言語行動であるということが指摘されている。論文で十分論考できなかった点も踏まえ、今後の研究の課題としたい。

論文審査結果の要旨

本研究は、日本語の文理解処理における、文から句への分節処理（phrasal segmentation）を取り上げ、句への分節処理に関わる脳内の処理段階、処理領域を、fMRI(functional Magnetic Resonance Imaging)を使うことにより、明らかにしようとしたものであり、6章からなる。

まず、第1章で研究の問題提起を行い、第2章で、文処理モデルの先行研究では、句への分節の問題に対する研究にまだ手が付けられていないことを指摘し、第3章では、句への分節処理の処理段階と脳内での処理領域に関する仮説を立て、fMRI実験をもとに、直列処理モデルと並列処理モデルの2つの文理解モデルの正当性、妥当性を明らかにすることが本研究の目的であると述べる。

第4章では、視覚刺激を用いたfMRIによる実験を実施し、その結果、日本語の分節処理には、左脳下前頭回（left inferior frontal gyrus）の眼窩部（par orbitalis）（BA47）の関与が認められたが、当初予測した統語領域（BA44/45）の関与も幾分かは認められたが、分節処理に限った強い脳の活性は見られなかったと報告する。

第5章では、第4章と同じ条件ではあるが、視覚ではなく聴覚刺激を用いたfMRIによる実験を実施し、その結果、日本語の聴覚的分節処理には、視覚的分節処理と同様に、左脳下前頭回（left inferior frontal gyrus）の眼窩部（par orbitalis）の関与が認められたと述べ、また、当初予測した統語領域（BA44/45）の関与も幾分かは認められたが、分節処理に限った強い脳の活性は見られなかったと報告する。

第6章では、上の2つの実験結果を受けて、句への分節処理が、視覚・聴覚のモダリティに関わらず、普遍的な神経基盤を持つ言語処理能力であること、また統語レベルの句への分節処理には、韻律情報の処理の関与が認められないことを指摘し、更に分節処理では、統語処理を基盤としながらも、意味処理の関与が認められたということから、分節処理の実験結果が、並列処理モデルの言語情報間の交互作用を認める仮説と合致し、分節処理を含む文理解処理が並列処理モデルでよく説明されることを指摘する。

本研究で得られた、文理解における句レベルの処理が、統語情報に基づく処理を基盤としながら、意味情報の処理の影響を受けるという結果は、行動データに基づく心理言語学の先行研究、言語理論に基づく言語処理の先行研究の予測をイメージングの手法を用い実証的に裏付ける結果である。故に本研究は人間の言語処理を理解しモデル化するうえで、実証的価値の高いものである。

本論文の内容は、その筆者が自立した研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有することを示すものである。よって、本論文は、博士（国際文化）の学位論文として合格と認める。